

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO



INSTITUTO DE FÍSICA
LICENCIATURA EM FÍSICA

PROJETO DE INSTRUMENTAÇÃO PARA O ENSINO DE FÍSICA

A lei de Boyle como exemplo de experimentação e aprendizagem

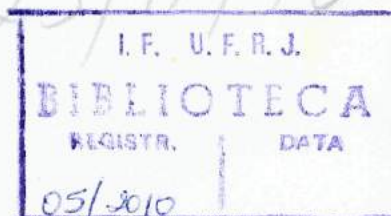
Fábio Rinaldi

Orientador: Prof. Vitorvani Soares

2010/2

05/2010

5ª série
Local ?



A lei de Boyle como exemplo de experimentação e aprendizagem

Ficha catalográfica

Rinaldi, Fábio

A lei de Boyle como exemplo de experimentação e aprendizagem, Fábio Rinaldi
— Rio de Janeiro: Projeto de Instrumentação para o Ensino de física — Instituto
de física/UFRJ, 2010.

1. Fluidos 2. Hidrostática. 3. Lei dos gases. 4. Gás ideal. 5. Boyle.
6. Ciência — Ensino Médio. 7. Física clássica.

I. Título

Dedico este trabalho primeiramente a Deus que me deu a vida em um corpo forte e perfeito, e a possibilidade de ver e estudar o universo criado da mais profunda sabedoria. À minha doce e amada mãe Sônia Maria Rinaldi que me amou incondicionalmente desde o momento que soube que eu existia; que me apoiou nos bons e maus momentos sem desacreditar por um minuto que fosse na minha vitória. Aos meus avôs queridos Ignácia e Álvaro, tão presentes e preocupados com meu futuro e, finalmente, aos meus irmãos Simone, Alex, Rodrigo, Thiago e Ricardo por sempre me motivarem a seguir em frente.

Agradeço ao Colégio Liceu Nilo Peçanha que me cedeu espaço para prática e conclusão do meu estágio, e ao professor de Física Antonio Ricardo, pela paciência, bom humor e total dedicação nas minhas dúvidas didáticas que não foram poucas. Agradeço também ao professor Vitorvani Soares, figura ímpar nesta profissão, que sente prazer em mostrar a seus instruendos uma Física belíssima, com encaixes perfeitos. Agradeço-o pelo empenho e dedicação ao ensinar-me seus conhecimentos adquiridos com muito tempo e esforço. Estendo ainda meus agradecimentos a todos os professores que participaram da banca examinadora.

RESUMO

Apresentamos neste trabalho desenvolvido por Robert Boyle sobre a descrição das propriedades elásticas do ar e acreditamos que os procedimentos apresentados e discutidos aqui possam ser de valia para uma aula alternativa para a determinação da lei dos gases ideais.

Em geral, nos cursos de física, os conceitos físicos são apresentados aos alunos *a priori*, sem nenhuma ou muito poucas justificativas e, ao aluno, só resta “verificar” as fórmulas apresentadas. O objetivo deste trabalho é construir estes conceitos físicos partindo-se da observação e da análise da interdependência entre a pressão submetida e o volume ocupado por um gás e obtermos, deste modo, a equação de estado dos gases apresentadas habitualmente nos livros didáticos.

O presente trabalho tem um duplo objetivo. Primeiramente, observamos que o volume ocupado por um gás — em nosso caso, o ar ordinário — varia em função da pressão exercida por uma coluna de água mais a pressão atmosférica e, a partir desta informação, podemos construir com os alunos um modelo matemático para representar uma relação entre as grandezas físicas envolvidas: procedemos somente a partir da aquisição e a análise dos dados experimentais, sem nenhum conhecimento prévio da lei de Boyle. Em seguida, descrevemos em detalhes como Boyle procedeu ao realizar o seu experimento e estabelecer a sua famosa lei.

Acreditamos que a nossa proposta em ensinar física aos alunos por meio de experimentos simples e de custo modesto desmistifique um pouco o mito que fazer ciência é sempre um processo caro e acessível a somente uns poucos privilegiados e permite ao aluno ser um participante ativo do processo científico.

ÍNDICE

RESUMO.....	9
1. INTRODUÇÃO	13
2. UM POUCO DE HISTÓRIA	17
3. COMPRIMINDO O AR... COM ÁGUA	27
O APARATO EXPERIMENTAL.....	28
MONTAGEM DO APARATO EXPERIMENTAL	29
DADOS EXPERIMENTAIS.....	32
4. A NOTÁVEL EXPERIÊNCIA DE BOYLE.....	39
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	49
APÊNDICE: A LEI DE BOYLE NA PRÁTICA	51
ASPECTOS FISIOLÓGICOS.....	51
REFERÊNCIAS	57

1. INTRODUÇÃO

Procuramos neste trabalho estabelecer a lei de Boyle através de um procedimento diferente dos usualmente apresentados nos livros didáticos. Em geral, esses textos enfatizam o emprego de fórmulas, em situações artificiais, privilegiando a linguagem matemática em detrimento do seu significado físico e tornando o estudo da física uma simples resolução de problemas aparentemente sem conexão com o cotidiano dos alunos.

Seguindo os padrões do PCN, empregamos um experimento relativamente simples para revelar um fenômeno natural extremamente importante que abriu uma longa estrada para a ciência moderna, resolvendo inúmeros problemas para a indústria e melhorando as condições da sociedade ao longo da história. Com esta experiência tentamos despertar o censo crítico de observação do aluno, extrair os dados relevantes à experiência e com eles estabelecer uma equação matemática capaz de representar este fenômeno de uma forma clara e concisa.

O método tradicional de apresentar a Física aos alunos lhes tira a paixão de aprender, a mesma paixão que inspirou homens como Robert Boyle, Robert Hooke, Isaac Newton, entre tantos outros. Qual o professor que nunca escutou: "Para que aprender isso se eu nunca vou usá-lo?". A física não serve apenas para reprovar alunos, pelo contrário, é uma disciplina que construiu o mundo a nossa volta e está sempre em franco desenvolvimento, totalmente dinâmica, possibilitando a invenção de equipamentos e tecnologias em prol da humanidade. Hoje, o que seria da medicina sem a física? A indústria automobilística? O homem teria chegado ao espaço ou ao fundo do mar sem os conhecimentos da física? Claro que não. E é isso que pretendemos mostrar aos alunos: a sua importância, a sua verdadeira contribuição pra sociedade, ligando os fenômenos físicos à vida cotidiana de cada de um deles.

Primeiramente, observamos com os alunos que o volume ocupado pelo ar ordinário varia em função da pressão exercida por uma coluna de água mais a pressão atmosférica. A partir desta observação, podemos construir junto com eles um modelo matemático para representar uma relação entre as grandezas

físicas envolvidas, procedendo somente a partir da aquisição e a análise dos dados experimentais, sem nenhum conhecimento prévio da lei de Boyle. Em seguida, descrevemos em detalhes como Boyle procedeu para estabelecer a sua famosa equação. Os procedimentos aqui discutidos são uma extensão natural das idéias apresentadas nos trabalhos de monografia de Romero [1] e de Neves [2] relativos ao desenvolvimento da hidrodinâmica e de seus conceitos.

Espera-se que o método apresentado neste trabalho, partir da experiência para obter-se uma expressão matemática *a posteriori*, sirva de base e incentivo ao aluno para que sua aprendizagem torne-se interessante e sólida, e o ajude a compreender com profundidade os primeiros passos que em geral são feitos no processo do fazer ciência.

O que se propõe aqui é seguir as diretrizes dos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCNs) [3] para o ensino de física, tendo especial atenção às suas orientações complementares.

“O ensino de Física tem-se realizado freqüentemente mediante a apresentação de conceitos, leis e fórmulas, de forma desarticulada, distanciados do mundo vivido pelos alunos e professores e não só, mas também por isso, vazios de significado. Privilegia a teoria e a abstração, desde o primeiro momento, em detrimento de um desenvolvimento gradual da abstração que, pelo menos, parta da prática e de exemplos concretos. Enfatiza a utilização de fórmulas, em situações artificiais, desvinculando a linguagem matemática que essas fórmulas representam de seu significado físico efetivo. Insiste na solução de exercícios repetitivos, pretendendo que o aprendizado ocorra pela automatização ou memorização e não pela construção do conhecimento através das competências adquiridas.”

Essa transcrição enfatiza o que realmente vem acontecendo nas escolas, seja por professores desmotivados por baixos salários ou péssimas condições de trabalho. A proposta dos PCNs é aplicar o conceito aprendido pelo aluno em sala na sua própria vida cotidiana. Para isso o aluno deve aprender e desenvolver uma série de competências e habilidades como, por exemplo [3]:

*“Compreender enunciados que envolvam códigos e símbolos físicos.
Compreender manuais de instalação e utilização de aparelhos.”*

“Utilizar e compreender tabelas, gráficos e relações matemáticas gráficas para a expressão do saber físico. Ser capaz de discriminar e traduzir as linguagens matemática e discursiva entre si.”

“Desenvolver a capacidade de investigação física. Classificar, organizar, sistematizar. Identificar regularidades. Observar, estimar ordens de grandeza, compreender o conceito de medir, fazer hipóteses, testar.”

“Compreender a Física presente no mundo vivencial e nos equipamentos e procedimentos tecnológicos. Descobrir o “como funciona” de aparelhos.”

“Construir e investigar situações-problema, identificar a situação física, utilizar modelos físicos, generalizar de uma a outra situação, prever, avaliar, analisar previsões.”

“Articular o conhecimento físico com conhecimentos de outras áreas do saber científico.”

“Reconhecer o papel da Física no sistema produtivo, compreendendo a evolução dos meios tecnológicos e sua relação dinâmica com a evolução do conhecimento científico.”

Com a realização de experimentos, é nossa preocupação estimular a discussão sobre determinados conceitos que pareçam abstratos inicialmente e despertar a curiosidade entre os alunos de maneira a ampliar a sua visão do mundo. Deste modo, desenvolvemos este projeto visando oferecer um recurso a mais aos professores no ensino de física, em geral, e na teoria dos gases, em particular.

Para descrever a proposta de aula delineada no início desta introdução, organizamos a presente monografia da seguinte forma: No Capítulo 2 oferecemos um breve histórico sobre os principais personagens envolvidos no desenvolvimento dos temas abordados neste trabalho e destacamos a importância do experimento de Boyle como paradigma do desenvolvimento científico. No Capítulo 3 apresentamos o nosso experimento da compressão do volume de ar por

uma coluna de água e pela coluna de ar atmosférico e estabelecemos uma relação algébrica entre as grandezas físicas envolvidas. No Capítulo 4 descrevemos em detalhes a experiência de Boyle para a determinação da sua famosa equação. Para finalizar, no último capítulo, apresentamos as nossas considerações finais sobre a proposta apresentada neste trabalho.

2. UM POUCO DE HISTÓRIA

Como tem sido discutido em muitos trabalhos de história da ciência, a descoberta científica e o desenvolvimento tecnológico não estão dissociados do contexto histórico e social da sua época e, como veremos, a lei de Boyle não é exceção. Neste capítulo apresentaremos um pouco da história de Boyle, sobre como ele obteve a sua famosa lei e como ela passou ao seletivo grupo das experiências paradigmáticas da ciência. Ela é consequência de determinadas conjecturas muito importantes sobre o comportamento da natureza e, para compreendermos como Boyle obteve a sua lei dos gases ideais descrevemos um pouco a vida de Boyle, o contexto social deste período histórico e como os cientistas desta época interpretavam a natureza.



Figura 1. Robert Boyle (1627–1691) como retratado por Johann Kerseboom, por volta de 1689 [4].

Nascido em 27 de janeiro de 1627, em Lismore, County Waterford, Irlanda, Robert Boyle foi o mais jovem dos quatorze filhos do riquíssimo Richard Boyle, o

Conde de Cork, e foi educado em latim, grego e francês ainda na infância. Após a morte da mãe, quando tinha somente oito anos, foi enviado ao Eton College, na Inglaterra, para completar a sua educação e, em seguida, partiu em viagem com um tutor francês pela Europa.

Entre os vários lugares que visitou, a cidade de Florença merece destaque. Ele permaneceu por lá entre 1641 e 1642, e pode presenciar os últimos anos de vida de Galileu Galilei. Ainda na mesma viagem, quando passou pela França, teve contato com a obra de Pierre Gassendi, profundo defensor da teoria atomística. Muito embora o pai de Boyle tenha perdido a vida e parte da fortuna em 1642 ao final da rebelião irlandesa, seus filhos recuperaram as suas antigas terras e parte da herança perdida.

Apesar de toda a riqueza pessoal, Boyle nunca se casou e quando mudou-se para Oxford, em 1656, ele passa a viver com sua irmã Lady Katherine Ranelagh, que o amparou de diferentes maneiras. É ela quem o apresenta a amigos influentes membros do parlamento britânico e são estes mesmos amigos que os ajudam a recuperar os bens perdidos. Boyle vive os últimos vinte anos de sua vida na casa de sua irmã em Pall Mall, e morre em 31 de dezembro de 1691, em Londres, Inglaterra, aos 64 anos.

Ao conhecer o contexto social e intelectual da época de Boyle, observamos que ele estudou os escritos dos filósofos naturais, como então eram denominados os cientistas que trabalhavam nos grandes desafios intelectuais da época. Também aprendemos que Boyle vivia em uma Europa onde ainda valiam as teorias Aristotélicas e a Igreja detinha forte poder sócio-político. A Inglaterra sofria um dos seus períodos de maior turbulência histórica, a guerra civil inglesa, que durou de 1640 à 1661, e a turbulência destes vinte anos deram origem ao desenvolvimento de idéias novas e radicais sobre a igualdade social, política e econômica [5].

Nesta época, os filósofos da natureza se dividiam, *grosso modo*, em animistas e mecanicistas. Os primeiros acreditavam que a matéria possuía vida e consciência. Assim, não somente os humanos teriam uma racionalidade e faculdades perceptivas e sensitivas mas também a poeira e as rochas possuiriam alguma forma de percepção. Isto os levava a crer que a matéria poderia mover-se por sua própria vontade.

Os mecanicistas, por sua vez, se opunham a esta forma de descrição da natureza e Boyle de alguma forma poderia ser classificado nesta outra categoria de

filósofos naturais, aqueles partidários de uma “filosofia corpuscular” ou “mecânica” da natureza.

Uma das questões paradigmáticas da qual Boyle se ocupou foi a questão da constituição da matéria e da existência ou não do vácuo. A teoria atômica tal como conhecemos começou por volta de 400 a.C. com os gregos Leucipo e Demócrito [6] e até hoje ainda intriga a comunidade científica. Entretanto, mesmo depois de 2000 anos o homem ainda não conhece as verdadeiras propriedades fundamentais da matéria e seus componentes. É nesta época da visita de Boyle a Paris que a defesa da teoria atomista da matéria é reativada por Pierre Gassendi (1592-1655) e por outro grande filósofo dessa época, o também francês René Descartes (1596-1650).

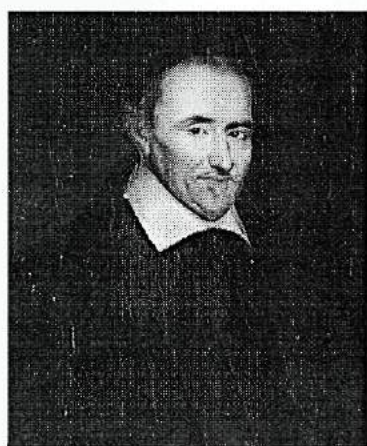


Figura 2. Pierre Gassendi (1592–1655), em pintura de Louis-Edouard Raoult, feita em 1636 [7], e René Descartes (1596–1650) em pintura de Bourdon [8].

Com base na “filosofia corpuscular”, e certamente influenciado pelos trabalhos de Gassendi e Descartes, Boyle escreveu um importante livro, *The Sceptical Chemist*, onde ele abandona a teoria dos cinco elementos aristotélicos e ajuda a acelerar o desenvolvimento científico e as concepções sobre elemento químico.

Ainda neste mesmo período, teremos Galileu Galilei (1564-1642), físico, matemático, astrônomo e filósofo italiano — que teve um papel importantíssimo na revolução científica — e Evangelista Torricelli a se ocuparem de problemas relacionados a pressão dos corpos. O grande problema motivador era o problema das bombas aspirantes, usadas para retirarem água dos poços e lançá-las a grandes alturas.

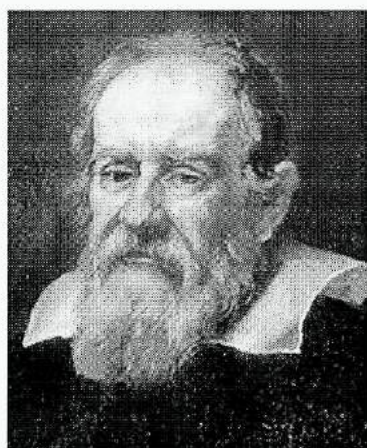


Figura 3. Galileu Galilei (1554-1642), em pintura de Sustermans, feita em 1636 [9], e Evangelista Torricelli (1608-1647) [10].

O assunto sobre a arte de bombear foi um fator preponderante no desenvolvimento do conceito de “pressão atmosférica”. O problema era que as bombas só elevavam a água até 10,33 metros de altura impossibilitando a realização de tarefas que necessitavam que a água fosse elevada à alturas maiores. A explicação para isso era totalmente aristotélica: como as bombas possuíam êmbolo e eles eram os responsáveis por sugar a água, então entre o êmbolo e água tenta-se formar um espaço vazio, o que, segundo ele, não seria permitido pela natureza. Deste modo:

“a água segue o êmbolo de uma bomba aspiradora como se a ela aderisse, porque a natureza tem horror ao vácuo: se a água não se

agarrava ao êmbolo, era porque se criava, entre eles, um espaço vazio, o que a natureza não pode tolerar” [11].

Galileu foi informado sobre o problema, mas manteve-se conservador em certas idéias. Segundo Conant, [] a explicação de Galileu foi a seguinte:

“como no caso de um fio de cobre suspenso, há um rompimento em que seu próprio peso o rompe, devendo dar-se o mesmo com a coluna de água elevada pela bomba”. [12]

A obra de Galileu *Discorsi e Dimostrazioni Matematiche* inspirou várias experiências, dentre elas, a de Gasparo Berti chama atenção. Ela foi realizada em 1641 e é descrita seguinte maneira [13]:

Um tubo (AB) comprido foi colocado do lado de fora da casa, sendo que a parte superior do tubo ficou em frente à janela da casa, a outra junto ao solo. Em sua base foi posta uma torneira de latão®. O tubo ficava dentro de um tonel (EF) cheio de água. Na parte superior foi adaptado um recipiente de vidro com formato esférico, com um orifício (C), lacrado com um parafuso de latão(D).

Evangelista Torricelli (1608-1647), italiano, foi aluno e secretário de Galileu Galilei, ficando em seu lugar após sua morte. Após discutir um problema dos poços com Galileu, chegou a conclusão inédita que o ar atmosférico contrabalanceava a coluna d'água até essa altura. Para provar isso, ao invés de trabalhar com a água como havia sido feito por Berti, ele sugeriu o mercúrio, cerca de 14 vezes mais pesado. Então a camada de gás que envolvia a Terra seria capaz de equilibrar uma coluna de $1/14$ da coluna de água, ou seja, aproximadamente 76 cm. Assim seria uma coluna de líquido mais fácil de trabalhar.

O que se percebe é que o experimento de Torricelli é uma variação do experimento de Berti [13], o que muda realmente é que Torricelli era adepto da concepção moderna: a de que os efeitos são atribuídos à pressão atmosférica, apesar da idéia de usar mercúrio ser relatada por Galileu no seu *Discorsi*, como percebe-se pelo trecho:

"[...] E acredito que os mesmos resultados ocorreriam em outros líquidos, tais como o mercúrio, vinho, óleo, etc., nos quais a ruptura ocorrerá a uma altura menor ou maior que 18 cúbitos, de acordo e inversamente com a maior ou menor gravidade específica desses líquidos em relação à água; sempre medindo essas alturas perpendicularmente"[13,14].

A experiência de Torricelli indica que ele usou um tubo de mais ou menos um dedo de largura e três pés de comprimento. Com uma das extremidades vedada, ele o encheu completamente de mercúrio. Em seguida, tampando a outra extremidade com o dedo, ele inverteu o tubo e o colocou em um recipiente aberto cheio de mercúrio [14]. O relato de seu raciocínio ao realizar esta experiência está descrito na carta que redigiu a Ricci, em 11 de junho de 1644, onde ele escreve:

"[...] Embora o mercúrio se sustentasse, sendo pesadíssimo, essa força que dirige o mercúrio contra a sua natureza de cair para baixo, conforme se acreditou até agora, fosse interna ao tubo, ou ao vácuo, ou a essa matéria extremamente rarefeita; mas eu mantenho que é externa e que a força vem de fora[...] Também a água em um vaso semelhante, mas muito mais longo, subirá até quase 18 braças, isto é, tanto mais em relação ao mercúrio quanto o mercúrio é mais pesado do que a água, para equilibrar-se com a mesma causa que empurra um e outro"[14].

Devido a essa experiência, atribuída a Torricelli, a pressão atmosférica pode então ser medida pela primeira vez. Constatou-se, a partir dela, que o nível de mercúrio descia deixando um espaço aparentemente vazio na parte superior do tubo, e a coluna de mercúrio se estabilizava em torno de 76 cm. Para explicar esse resultado, Torricelli dizia que o mercúrio se deslocava devido ao peso do ar que o pressionava na cuba. Coube então a ele o título de ser a primeira pessoa a produzir um vácuo, o denominado vácuo torrecilliano [15].

Essa experiência possibilitou que o matemático francês Blaise Pascal (1623-1692) a repetisse na companhia do geógrafo francês Pierre Petit (1598-1677), amigo de seu pai. Em 1648, no dia 19 de setembro, por sugestão de Pascal, Florin

e P  rier foram   montanha Puy-de D  me, próximo a Clermont Ferrand (cidade onde nascera e vivera). No alto da montanha perceberam que havia uma diferença de 8 cm nos níveis indicados nos tubos torricellianos (construídos pelo próprio Pascal) quando comparados com as medidas realizadas ao p   da montanha.

Esse resultado confirmou a suspeita de Pascal sobre a varia  o da pressão atmosférica com a altura em que era medida e ele concluiu que isto ocorreria porque o peso do ar não é o mesmo em diferentes alturas. Portanto, a coluna de mercúrio varia com a pressão sob qual está submetida. A pressão atmosférica era responsável pelos fen  menos observados e, assim, derrubava a teoria do “horror ao vácuo” [16].



Figura 4. Blaise Pascal (1623–1662), em pintura de de autor desconhecido, feita no séc. XVII [17], e suposta imagem de Robert Hooke (1554–1642), em pintura da historiadora da ciência e artista Rita Greer, feita em 2004 [18].

O conhecimento prévio sobre a pressão dos líquidos descritos por antecessores a Pascal do calibre de Arquimedes (400 a.C) e Simon Stevin (1548 – 1620) [12] permitiram que ele elaborasse inúmeros trabalhos sobre sifões, seringas, tubos de vários tamanhos e formas que trabalhavam com líquidos diferentes. Após sua morte, foi publicado um de seus tratados sobre hidrostática esclarecendo várias d  vidas sobre o princípio barométrico e a prensa h  dr  lica, além de conter o seu famoso princípio: “em um líquido em repouso ou equilíbrio,

as variações de pressão transmitem-se igualmente e sem perdas para todos os pontos da massa líquida”.

Deste modo, é em torno de 1640, que Torricelli e Pascal estabelecem as bases do conceito de vácuo e que o ar tem peso e exerce pressão. Entretanto, somente em 1660 Hooke enuncia a sua famosa lei estabelecendo uma relação geral para a deformação dos corpos e teremos ainda que esperar até 1675, quando então Hooke colabora com Boyle na realização dos experimentos que darão origem à determinação da famosa lei de Boyle para a deformação dos gases, e quando é então demonstrado que estes se comportam como uma mola.

Depois da sua viagem ao continente europeu, entre 1641 e 1642, Boyle se dedica ao estudo da natureza e nos diz que um dos propósitos dos seus experimentos é apoiar a hipótese de que o ar tem peso e compressibilidade e derrotar a hipótese animista de que a natureza abomina o vácuo. Por causa da grande influência dos filósofos franceses e, em particular, do método cartesiano, Boyle aprende a expressar suas opiniões de maneira clara e objetiva e adota a proposta mecanicista para a descrição do nosso universo.

Quando passou a residir na cidade de Oxford, conhece muitos cientistas que também compartilham de seus pensamentos. Algum tempo mais tarde começa a freqüentar reuniões com outros jovens da área de ciências interessados em desenvolver uma nova Filosofia, a Filosofia Experimental, baseada na razão e na observação dos fenômenos; na coleta de dados e em um possível tratamento matemático. Para maximizar seus objetivos, o grupo funda inicialmente a Sociedade Real de Londres para o desenvolvimento das Ciências Naturais. Algum tempo depois criam a Royal Society, que tinha como farol o experimentalismo.

Em 1655, emprega como seu assistente um rapaz com um notável conhecimento em engenharia, mecânica, matemática e astronomia, Robert Hooke. Ele era encarregado de idealizar, construir e operacionalizar muitos dos experimentos utilizados nos encontros semanais da sociedade, pois ocupava o cargo de “curador de experimentos” da Royal Society e o fez com grande genialidade. Sendo a conexão entre o filósofo e o técnico, Hooke torna-se decisivo nas grandes descobertas realizadas por Boyle [19].

Durante esse período em Oxford, Boyle contribui de maneira significativa para a Ciência, tanto no caráter filosófico como experimental. Entretanto, somente a partir de 1657 ele começaria escrever seu nome na história da Ciência. Estimulado por outros trabalhos à cerca do vácuo, Boyle solicita a Hooke a

confecção de uma bomba pneumática, com a qual foi possível obter os importantes resultados descritos no *New Experiments Physico-mechanical, Touching the Spring of the Air and its Effects*, (*Novos Experimentos Físico-Mecânicos, Concernentes à Elasticidade do Ar e Seus Efeitos*). Os experimentos realizados com a bomba pneumática tornaram possível explicar que: (i) a suspensão da coluna de mercúrio no tubo barométrico, descrita por Torricelli era mesmo devida à pressão atmosférica; (ii) que o som não se propaga no vácuo; e (iii) que o ar era indispensável à vida e à combustão e era caracterizado por uma elasticidade permanente.

Esta publicação sofreu grande repulsa na época por não ser embasada nos conhecimentos aristotélicos, e recebeu inúmeras críticas. Essas críticas obtiveram resposta em 1662, com uma nova publicação. Esta edição incluiu um apêndice onde com novos experimentos Boyle apresenta sua famosa relação entre a pressão e o volume dos gases mantendo-se a temperatura constante.

3. COMPRIMINDO O AR... COM ÁGUA

Uma das propostas desse trabalho é transmitir os conhecimentos de física usando-se para isso um experimento e, a partir dele, determinar uma expressão matemática que sintetize uma relação entre as grandezas físicas consideradas na experiência. Para facilitar ainda mais este processo, empregamos uma experiência de baixo custo. Isso torna seguramente mais fácil o acesso dos alunos à experimentação, tornando a disciplina menos abstrata, que é um fator a mais para afastar os instruídos da física. Além do mais, a experimentação agrega uma gama variada de habilidades que o aluno deve aprimorar, tais como, por exemplo, a observação, a mensuração, a construção e a interpretação de gráficos, entre outras atividades. Isso torna o processo de aprendizagem mais eficiente, sem falar no aumento de interesse por parte do aluno quanto ao assunto.

Poderíamos dividir esse processo em fases. A primeira delas seria uma análise por parte dos alunos quanto às grandezas envolvidas na experiência. Poderia ser, por exemplo, por meio de um questionário com questões sobre fenômenos do cotidiano que abordam o tema para avaliar o grau de conhecimento conceitual dos alunos. A segunda fase seria a apresentação do experimento em sala de aula sem alertá-los sobre o tema da aula. Assim despertaria mais curiosidade, prendendo a atenção dos alunos.

Seria ainda de grande riqueza contextualizar o experimento historicamente, relatando a importância dessa experiência para o progresso da sociedade. Na terceira fase os alunos realizariam a experiência mas o professor deve dar as diretrizes de como fazê-lo, mostrar aos alunos quais grandezas que estão envolvidas e são possíveis de serem medidas com o nosso experimento. Nessa fase, creio que a mais interessante, o professor deve explorar todas as dúvidas dos alunos de modo a enriquecer o conteúdo do tema e tornar o aprendizado mais consistente e interdisciplinar.

O aparato experimental

Nosso experimento tem caráter de baixo custo, então nada melhor do que simular o tubo em formato de “J” usando tubo e conexões de PVC. Trabalhar com este tipo de material traz uma série de vantagens: é encontrado com facilidade por toda a rede comercial de material para construção e é de fácil manuseio. Podemos empregar cola para PVC para conectá-los e eles pode ser cortado com uma simples serra, também encontrada nas lojas. Eles possuem ainda medidas padronizadas, e são muito baratos.

O nosso aparato experimental é formado por:

- Dois cotovelos de 25 mm de PVC.
- Um T de 25 mm com fêmea roscada de PVC.
- Uma torneira de plástico com rosca de 25 mm.
- 50 cm de tubo de 25 mm de PVC.
- 3,10m de mangueira transparente de 25 mm.
- Três abraçadeiras grandes.
- Dois fixadores para tubo de 25 mm.
- Um bujão de PVC de 25 mm.
- Uma base de madeira de 20 cm por 50 cm
- Uma ripa de madeira de 50 cm.
- Uma ripa de madeira de 1,80 m
- Duas fitas métricas.
- Duas cantoneiras para fixação das ripas à base.
- Quatro parafusos para madeira, para prender os fixadores ao tubo de PVC.
- Quatro parafusos para prender as ripas à base.
- Tubo de cola para PVC pequeno.
- Fita veda rosca pequena.
- Serra para tubo PVC.
- Cinco presilhas plásticas para fixação.
- Funil comum de cozinha.

Montagem do aparato experimental

- Corte 3 pedaços de tubo com as seguintes medidas: 10 cm, 5 cm, 5 cm, 5 cm.
- Cole o tubo de 10 cm, e o tubo de 20cm a um cotovelo separadamente.
- Cole na conexão T os pedaços restantes de tubo de 5 cm, deixando a extremidade com rosca livre.
- Cole os cotovelos às extremidades dos tubos colados ao T, de modo que a saída do T fique perpendicular aos tubos dos cotovelos. Sua montagem deve ter originado um objeto parecido com a letra "C".
- Passe fita veda rosca na rosca da torneira e a atarraxe na conexão T de modo que a torneira fique paralela à conexão T. Isso facilitará na colocação do experimento em qualquer superfície plana, não precisando colocá-la apenas nas beiradas das mesas por exemplo.
- Coloque a estrutura sobre a base e distribua-a no centro da base, deixando a boca da torneira para fora da base. Faça alguma marcação para orientá-lo.
- Coloque os fixadores de tubo na base e a estrutura sobre eles, orientando-se pela marcação anterior, e marque os furos a serem feitos na base.
- Fure a base com broca de madeira e prenda a estrutura nos fixadores.
- Corte 122 cm e 180 cm de mangueira.
- Introduza na extremidade menor da estrutura os 122 cm de mangueira e prenda firmemente com uma abraçadeira.
- Na outra extremidade coloque uma abraçadeira e em seguida o bujão de modo a selar a extremidade, aperte a abraçadeira prendendo o bujão à mangueira.
- Na extremidade da estrutura coloque a mangueira e prenda-a com outra abraçadeira.

- Fure as ripas e parafuse as cantoneiras nas mesmas.
- Coloque a ripa maior rente a estrutura com mangueira maior. Tire a marcação da cantoneira e fure com a broca de madeira.
- Faça a mesma coisa do outro lado com a outra ripa menor.
- Cole a fita de marcação na ripa menor de modo que a origem comece na junção do cotovelo e o tubo de PVC, utilize 30 cm de fita
- Cole a fita de marcação na ripa maior utilizando como origem a junção do cotovelo com o tubo da extremidade maior da estrutura. Utilize 180 cm de fita.
- Prenda as mangueiras às ripas utilizando percinta plástica, ou também barbante, linha de pescar ou arame.

Após a montagem espera-se duas horas para se certificar que a cola de PVC secou corretamente. Enche-se a mangueira com água até a altura máxima da mangueira para testar as conexões quanto a vazamentos. Caso seja detectado algum vazamento nas conexões com cola, deve ser feito outro aparato. Se o vazamento for na rosca da torneira com a conexão em T, a mesma deve ser desenroscada, deve ser removida da torneira e da conexão o resto de fita e, finalmente, uma nova fita deve ser envolvida na rosca da torneira. O conjunto deve ser montado novamente seguindo os passos descritos anteriormente.

Feito os testes de vazamento e verificado que tudo está funcionando adequadamente, o experimento está então pronto para ser usado.

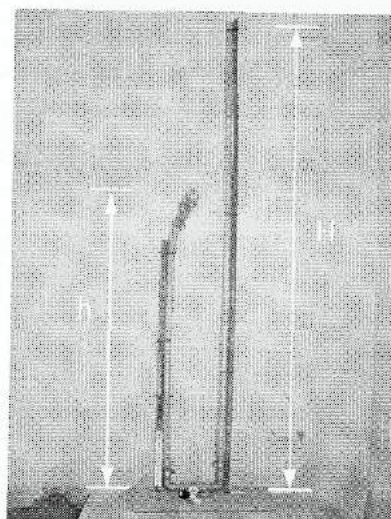


Figura 5. Foto do experimento com seus referenciais de medidas.

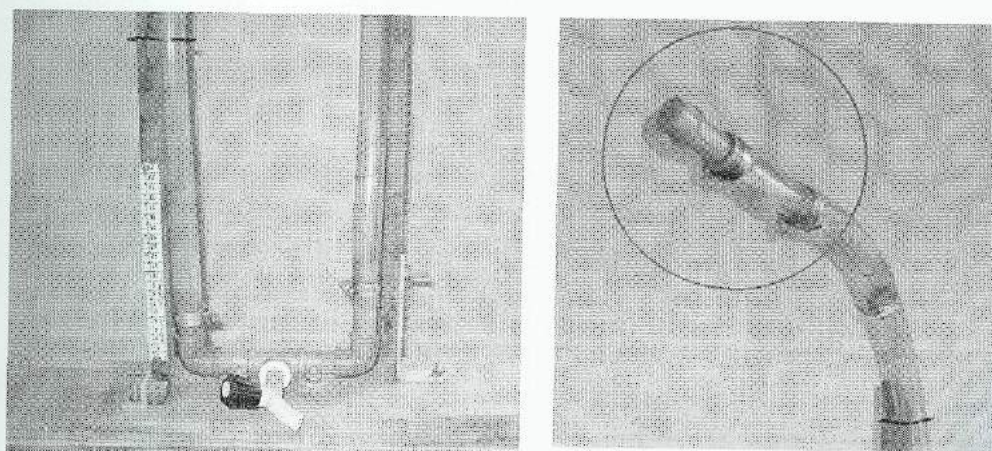


Figura 6. Foto do experimento pronto para uso. O círculo vermelho indica o bujão utilizado para evitar o escape do ar da mangueira.

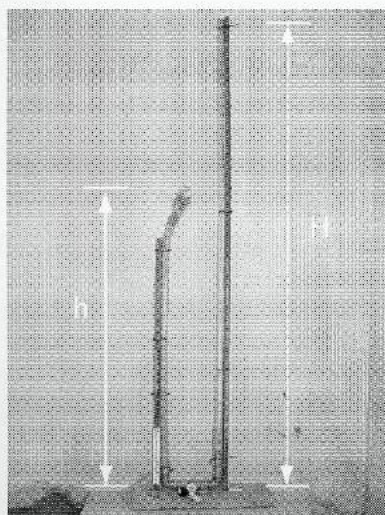


Figura 5. Foto do experimento com seus referenciais de medidas.

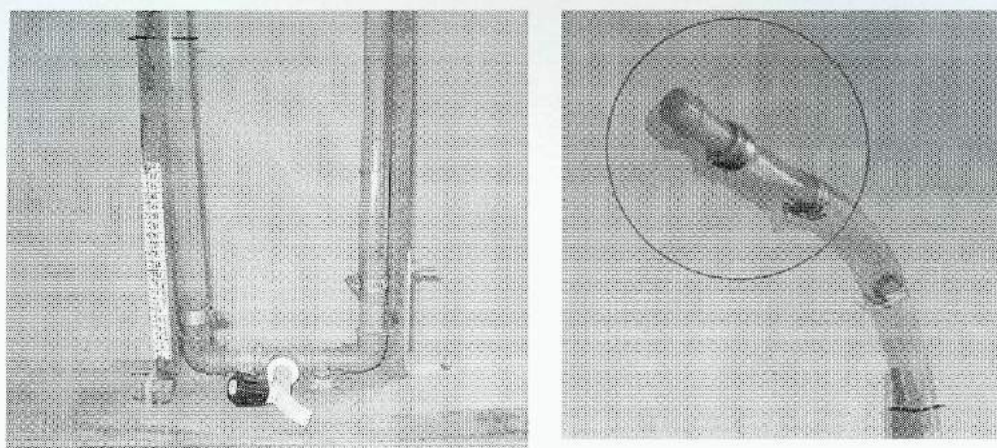


Figura 6. Foto do experimento pronto para uso. O círculo vermelho indica o bujão utilizado para evitar o escape do ar da mangueira.

Dados experimentais

Nessa experiência estabelecemos uma relação entre a pressão a qual está submetida uma certa quantidade de ar e o volume correspondente que ele ocupa. Para determinarmos a pressão nós dispomos das respectivas alturas que serão medidas na mangueira, isso simplifica a nossa observação e facilita a compreensão do fenômeno, como discutido nos trabalhos de final de curso de licenciatura de Romero [1] e de Neves [2].

Adicionamos água até que o nível esteja na origem, como indicado na Figura 7. Também é sugerido aos alunos que não adicionem água de qualquer maneira mas que procurem alturas determinadas. Também sugerimos que trabalhem a relação “causa” vs. “efeitos”, ou seja, o quê acontece quando adicionarmos água no tubo maior. Essa percepção ajudará no entendimento das grandezas envolvidas e, de como elas se comportam durante a experiência.

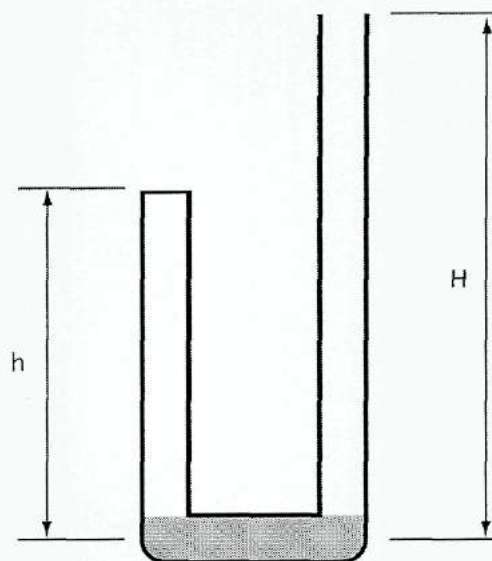


Figura 7. Condição inicial do experimento. A região em cinza representa a água que aprisiona o ar, à esquerda.

Na Tabela 1 apresentamos os dados iniciais de coluna d'água tanto no braço menor do tubo quanto no braço maior, além de nos informar em que temperatura a experiência foi realizada e qual o valor da pressão atmosférica em termos de coluna d'água.

Tabela 1. Dados experimentais.

<i>Altura inicial da coluna de ar h_0 (cm)</i>	<i>Altura inicial da coluna d'água H_0 (cm)</i>	<i>Pressão atmosférica em coluna d'água (m)</i>	<i>Temperatura ambiente T (K)</i>
$122,0 \pm 0,5$	$0,0 \pm 0,5$	$10,3 \pm 0,1$	299 ± 1

Nosso ponto de partida é a coluna de ar de 122 cm, no braço menor do nosso tubo, como ilustrado na Figura 8, que será comprimida com uma coluna de água de até 170 cm, no braço maior, conforme descrito na Tabela 2.

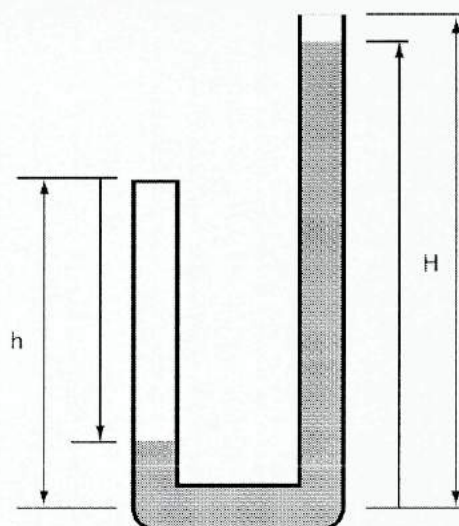


Figura 8. Condição final do experimento. Observe a redução do volume do ar aprisionado pela coluna d'água à esquerda.

Quando a altura da água alcança 62,5 cm nota-se que a coluna de ar diminui de 5,6 cm, ou seja, o ar dentro da mangueira foi comprimido pela pressão que a água exerce sobre ele juntamente com a camada atmosférica. Para variarmos dos 114,2 cm para 113 cm, observa-se que é preciso adicionar mais 21,0 cm de água, e assim sucessivamente. Para conseguirmos uma variação de 18,5 cm de compressão foi necessário 170,0 cm de coluna água.

Tabela 2. Dados experimentais.

<i>Altura H da coluna d'água ($\pm 0,5$ cm)</i>	<i>Altura h da coluna de ar ($\pm 0,5$ cm)</i>
62,5	116,4
71,0	115,7
75,5	115,3
80,0	114,6
85,4	114,3
90,5	113,8
96,4	113,2
100,0	112,8
110,5	111,9
120	111,0
130,3	110,1
140,5	109,2
150,0	108,3
160,0	107,3
170,0	106,4

Podemos considerar que o volume aprisionado de ar está sofrendo a ação da pressão exercida pela coluna de água e da pressão atmosférica e transformar os dados da Tabela 2 nos dados da Tabela 3:

Tabela 3. Análise dos dados da Tabela 2.

<i>Pressão da coluna d'água ($\pm 0,6$ cca)</i>	<i>Altura da coluna de ar h ($\pm 0,5$ cm)</i>	<i>Pressão da coluna d'água mais a pressão atmosférica ($\pm 0,5$ cmH₂O)</i>
62,5	116,4	1096,1
71,0	115,7	1104,2
75,5	115,3	1109,1
80,0	114,6	1113,9
85,4	114,3	1119,2
90,5	113,8	1124,1
96,4	113,2	1130,1
100,0	112,8	1133,8
110,5	111,9	1144,3
120	111,0	1153,7
130,3	110,1	1163,8
140,5	109,2	1174,3
150,0	108,3	1183,6
160,0	107,3	1193,4
170,0	106,4	1203,5

De posse dos dados experimentais, pode-se confeccionar um gráfico para que se compreenda realmente o comportamento do volume em relação à pressão e se estabeleça uma equação matemática que possa prever esse comportamento.

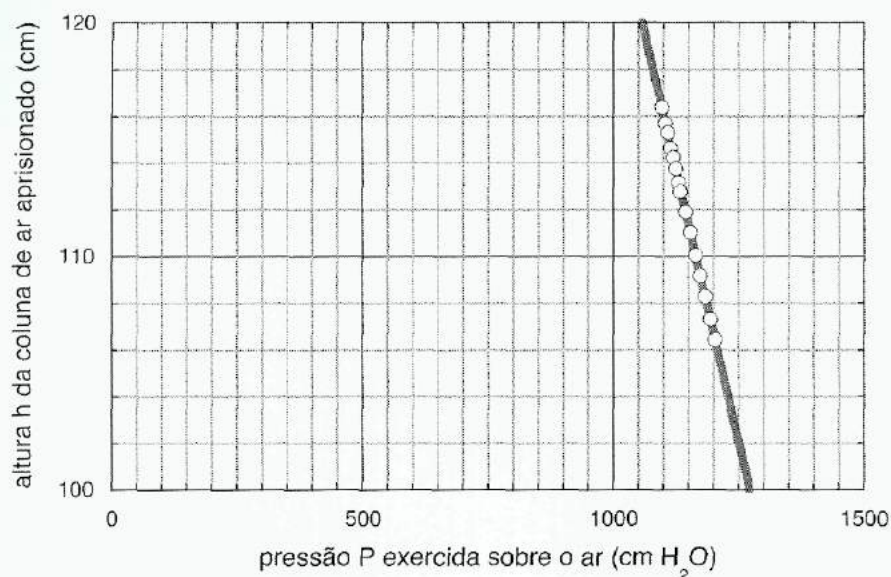


Figura 9. Representação gráfica da altura da coluna de ar aprisionado em função da altura da pressão exercida sobre ele, em cmH₂O.

Ao analisarmos o gráfico da Figura 9, obtemos a seguinte relação linear entre os parâmetros envolvidos:

$$h = a - bP, \quad (1)$$

onde

$$b \approx \frac{(20 \pm 1) \text{ cm}}{(225 \pm 5) \text{ cm}} \approx 0,089 \pm 0,006 \quad (2)$$

e

$$a = h + bP = 100 + (0,089)(1275) \approx (213 \pm 1) \text{ cm} \quad (3)$$

são, respectivamente, o coeficiente angular e linear da reta representada no gráfico. Portanto, esta análise revela que ao aumentarmos a pressão sobre o ar o seu volume diminui.

A pergunta que se faz é: será que a reta definida pela equação acima descreve por completo o fenômeno “h vs. P” ou só serve para essa região de observação da experiência?

Para solucionarmos este problema poderíamos realizar mais observações com o experimento. Para isso, precisaríamos aumentar a compressão do ar no tubo, o que só pode ser feito se aumentarmos significativamente a mangueira com água, e elevarmos o seu comprimento para cerca de 10 metros. Neste caso, a mangueira seria então maior do que um poste de iluminação pública! Isso tornaria o experimento impraticável, já que se trata de um aparato para ser utilizado em sala de aula.

Como resolver tal problema? De fato, a nossa experiência já foi realizada há muitos anos, no século XVII, por Robert Boyle. O que temos a fazer é utilizar seus dados como base e construir nossos gráficos a fim de estudar melhor o comportamento entre a pressão e o volume de um gás.

4. A NOTÁVEL EXPERIÊNCIA DE BOYLE

Trata-se do mesmo aparato simples, similar ao que empregamos anteriormente, mas com um grande valor científico. Como Robert Boyle estabeleceu a relação “pressão versus volume” é pouco conhecida torna a compreensão por parte dos alunos mais obscura. Explicaremos neste capítulo o método por ele utilizado e suas considerações a respeito da experiência, segundo a referência [20]..

Foi confeccionado um tubo de vidro em formato de J, a extremidade menor era selada e tinha uma altura de 12 polegadas (30,5 cm), enquanto que a perna maior media 8 pés (2,44 m). Ele preparou dois pedaços estreitos de papel, um deles foi fixado no braço menor e foi dividido em 12 polegadas e quartos de polegada. Já para a parte maior, ele o dividiu em 48 polegadas. Ele posicionou o J verticalmente e, então, despejou mercúrio pelo tubo maior até que uma coluna de 12 polegadas de ar ficasse aprisionada, e o nível de mercúrio nos dois ramos inicialmente fossem iguais.

Essa é a situação representada pelo topo da tabela. Então cuidadosamente ele adicionou mais mercúrio, pouco a pouco, no braço maior, e observou a compressão do ar no ramo menor. Pode-se notar, que na segunda linha da segunda coluna ele parou de despejar mercúrio quando a coluna de ar atingiu a marcação de $11 \frac{1}{2}$ polegadas. Essa notação em números decimais que parece ser tão complicada para nós, era comum na época. A notação decimal só se tornou comum no começo do século XVIII. A terceira coluna mostra (B), que nesta hora, fora adicionado em altura de mercúrio no membro maior $17/16$ polegadas. O papel marcador do membro maior era dividido em quartos da polegada, porém Boyle era capaz de interpolar os valores de medida em um quarto da menor divisão ($1/16$ da polegada). Ao todo Boyle adicionou mercúrio 24 vezes, até que a altura da coluna de ar se reduzisse a um terço do valor original e a altura adicional de mercúrio fosse $88 \frac{7}{16}$ polegadas [20].

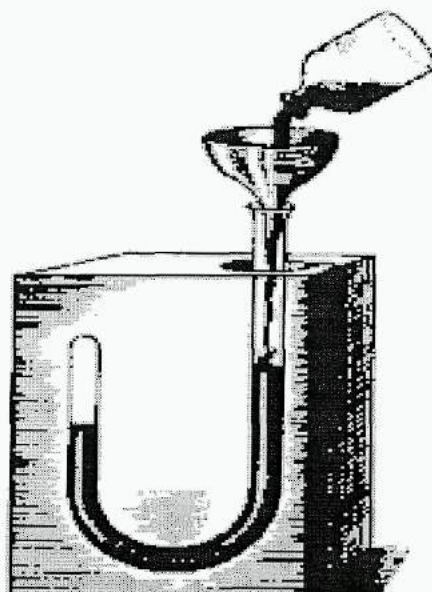


Figura 10. Ilustração da suposta caixa suporte de madeira com tubo de vidro em formato de "J" com mercúrio usado por Robert Boyle em sua experiência.

Boyle teceu vários comentários a respeito de como ele conduziu a experiência. Um dos grandes problemas descrito foi a fragilidade do tubo de vidro em relação à pressão exercida pela coluna de mercúrio chegando a quebrar o tubo. Para resolver isso, a parte inferior do tubo foi colocada num recipiente de madeira que além de dar um sustento melhor ao tubo, permitia que fosse recuperado o valioso mercúrio [20]. Boyle menciona que o mercúrio tinha que ser adicionado lentamente porque era muito mais fácil por o mercúrio no tubo do que retirá-lo do mesmo. Como o tubo era muito alto foi usada uma escada e também um pequeno espelho atrás do tubo para ajudá-lo a medir a altura do mercúrio com precisão.

A table of the condensation of the air.

<i>A</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	
48	12	00		$29\frac{5}{8}$	$29\frac{5}{8}$	<i>AA.</i> The number of equal spaces in the shorter leg, that contained the same parcel of air diversly extended.
46	$11\frac{1}{2}$	$01\frac{7}{8}$		$30\frac{9}{8}$	$33\frac{6}{8}$	
44	11	$02\frac{1}{8}$		$31\frac{1}{8}$	$31\frac{1}{8}$	
42	$10\frac{1}{2}$	$04\frac{6}{8}$		$33\frac{3}{8}$	$33\frac{1}{2}$	
40	10	$06\frac{3}{8}$		$35\frac{1}{8}$	35 -	<i>B.</i> The height of the mercurial cylinder in the longer leg, that compressed the air into those dimensions.
38	$9\frac{1}{2}$	$07\frac{1}{8}$		37	$36\frac{1}{8}$	
36	9	$10\frac{3}{8}$		$39\frac{1}{8}$	$38\frac{1}{2}$	
34	$8\frac{1}{2}$	$12\frac{3}{8}$		$41\frac{1}{8}$	$41\frac{1}{2}$	
32	8	$15\frac{1}{8}$	Added to $22\frac{1}{2}$ makes	$44\frac{1}{8}$	$43\frac{1}{4}$	<i>C.</i> The height of the mercurial cylinder, that counter-balanced the pressure of the atmosphere.
30	$7\frac{1}{2}$	$17\frac{1}{8}$		$47\frac{1}{8}$	$46\frac{1}{2}$	
28	7	$21\frac{1}{8}$		$50\frac{1}{8}$	50 -	<i>D.</i> The aggregate of the two last columns <i>B</i> and <i>C</i> , exhibiting the pressure sustained by the included air.
26	$6\frac{1}{2}$	$25\frac{1}{8}$		$54\frac{1}{8}$	$53\frac{1}{10}$	
24	6	$29\frac{1}{8}$		$58\frac{1}{8}$	$58\frac{1}{2}$	
23	$5\frac{3}{4}$	$32\frac{3}{8}$		$61\frac{1}{8}$	$60\frac{3}{4}$	<i>E.</i> What that pressure should be according to the hypothesis, that supposes the pressures and expansions to be in reciprocal proportion.
22	$5\frac{1}{2}$	$34\frac{1}{8}$		$64\frac{1}{8}$	$63\frac{1}{4}$	
21	$5\frac{1}{4}$	$37\frac{1}{8}$		$67\frac{1}{8}$	$66\frac{1}{2}$	
20	5	$41\frac{1}{8}$		$70\frac{1}{8}$	70 -	
19	$4\frac{3}{4}$	45 -		$74\frac{1}{8}$	$73\frac{1}{4}$	
18	$4\frac{1}{2}$	$48\frac{1}{8}$		$77\frac{1}{8}$	$77\frac{1}{2}$	
17	$4\frac{1}{4}$	$53\frac{1}{8}$		$82\frac{1}{8}$	$82\frac{1}{4}$	
16	4	$58\frac{1}{8}$		$87\frac{1}{8}$	$87\frac{1}{2}$	
15	$3\frac{3}{4}$	$63\frac{1}{8}$		$93\frac{1}{8}$	$93\frac{1}{4}$	
14	$3\frac{1}{2}$	$71\frac{1}{8}$		$100\frac{1}{8}$	$99\frac{1}{2}$	
13	$3\frac{1}{4}$	$78\frac{1}{8}$		$107\frac{1}{8}$	$107\frac{1}{4}$	
12	3	$88\frac{1}{8}$		$117\frac{1}{8}$	$116\frac{1}{2}$	

Figura 11. Dados experimentais de Boyle [20].

As colunas da Figura 11 tem o seguinte significado:

A	O número de espaços iguais na perna maior, que continha a mesma parcela de ar.
B	A altura do cilindro de mercúrio na perna maior, que comprimia o ar naquelas dimensões.
C	A altura do cilindro de mercúrio que contrabalanceava a pressão atmosférica.
D	A soma das colunas B e C, mostrando a pressão sustentada pelo ar incluído.
E	O valor teórico da pressão de acordo com a hipótese, que supõem que a pressão e a expansão devem ser proporcionalmente recíprocas.

A tabela original está em unidades de polegadas. Reescrevemos os valores na forma decimal para facilitar a compreensão.

Tabela 4. Dados originais de Boyle.

<i>A</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>
48	12,0	0,00		29,1	29,1
46	11,5	1,4		30,6	30,4
44	11,0	2,8		31,9	31,8
42	10,5	04,3		33,5	33,1
40	10,0	06,1		35,3	35,0
38	9,5	07,9		37,0	36,8
36	9,0	10,1		39,3	38,9
34	8,5	12,5		41,6	41,1
32	8,0	15,1		44,2	43,7
30	7,5	17,9	29,1	47,1	46,6
28	7,0	21,1	ADICIONADO	50,3	50,0
26	6,5	25,2		54,3	53,8
24	6,0	29,7		58,8	58,2
23	5,75	32,2		61,3	60,8
22	5,5	34,9		64,1	63,5
21	5,25	37,9		67,1	66,6
20	5,0	41,6		70,7	70,0
19	4,75	45,0		74,1	73,6
18	4,5	48,8		77,9	77,7
17	4,25	53,7		82,8	82,2
16	4,0	58,1		87,9	87,4
15	3,75	63,9		93,1	93,2
14	3,5	71,3		100,4	99,9
13	3,25	78,7		107,8	107,5
12	3,0	88,4		117,6	116,5

Tabela 5. Dados de Boyle, em cm.

<i>altura da coluna de mercúrio (cm)</i>	<i>altura da coluna de ar (cm)</i>
74.0	122
78.1	117
81.1	112
85.1	107
89.7	102
94.0	97
99.8	91
105.7	86
112.2	81
119.5	76
127.8	71
138.0	66
149.4	61
155.7	58
162.7	56
170.3	53
179.5	51
188.3	48
197.8	46
210.2	43
223.2	41
236.4	38
255.1	36
273.8	33

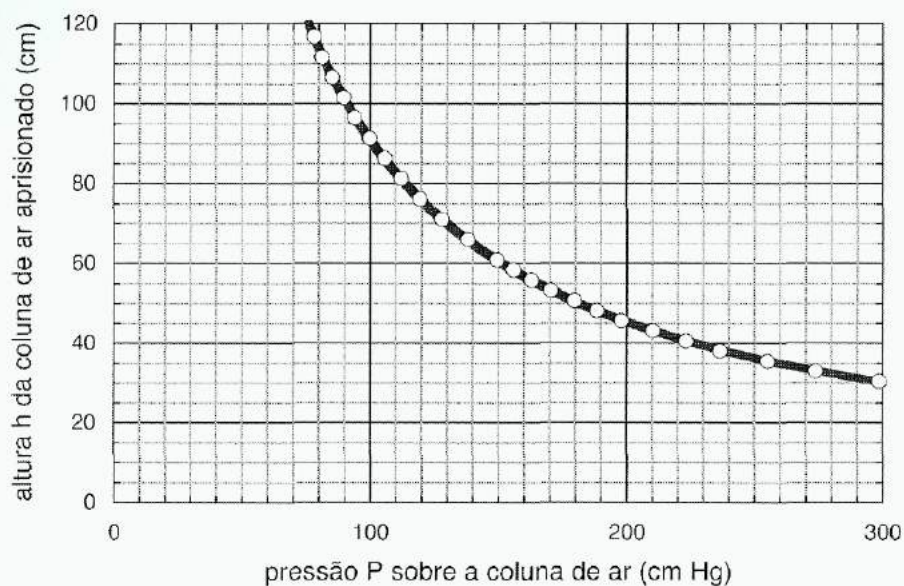


Figura 12. Gráfico obtido a partir dos dados experimentais de Robert Boyle.

Os pontos dispostos no gráfico mostram uma curva totalmente diferente da anterior, para nossa surpresa. A região de abrangência dessa curva é muito superior ao da encontrada em sala e, como se pode notar no gráfico acima, à medida que a pressão aumenta o volume diminui.

Vamos investigar uma possível forma analítica da curva da figura acima observando o comportamento do produto dos dois parâmetros físicos considerado, em um novo gráfico.

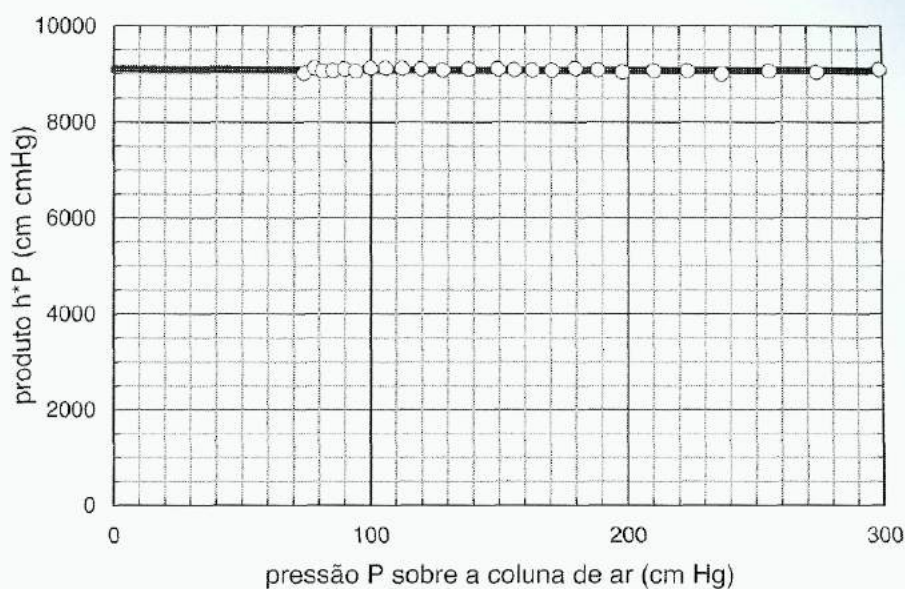


Figura 13. Gráfico do produto h^*P em função da pressão P sobre a coluna de ar.

Ao analisarmos o gráfico da Figura 13, obtemos a seguinte relação linear entre os parâmetros envolvidos:

$$hP = \beta P + \alpha, \quad (4)$$

onde

$$\alpha \approx (90,0 \pm 0,2) 10^2 \text{ cm cmHg} \quad (5)$$

e

$$\beta \approx 0 \quad (6)$$

são, respectivamente, o coeficiente linear e angular da reta representada no gráfico. Portanto, esta análise revela que, nas condições em que foi realizado o experimento, o volume aprisionado de ar é inversamente proporcional a pressão exercida sobre ele:

$$hP = \alpha \quad (7)$$

ou, ainda, como a seção do tubo vale $4,9 \text{ cm}^2$,

$$PV = 4,9\alpha, \quad (8)$$

temos finalmente

$$PV = (4,9)(90,0 \pm 0,2) \approx (450 \pm 1) 10^2 \text{ cm}^3 \text{ cmHg} \quad (9)$$

Portanto, se a pressão aumentar, o volume diminuirá na mesma proporção.

Boyle observou também que este valor poderia depender da temperatura em que a experiência é realizada, mas não chegou a estabelecer quantitativamente esta relação. Entretanto, conhecendo o coeficiente para uma dada temperatura — no nosso caso, a temperatura ambiente —, podemos estimar um novo estado para o gás considerado.

Deste modo, ao demonstrarmos para o aluno de onde surgiu a lei física através de uma experiência, o aluno cumpre todo o processo interdisciplinar, construindo um raciocínio sólido e utilizando todos os seus conhecimentos prévios. Obviamente no decorrer de todo o processo de aprendizagem o professor deve contextualizar a experiência, explicando a importância daquela lei pra época e a consequência para a sociedade da sua descoberta.

Mas como Robert Boyle conseguiu uma faixa de pressão muito maior do que o experimento feito em sala de aula usando-se água? É sabido que Boyle usou o Mercúrio (Hg), um metal líquido com uma densidade muito alta, $13,60 \text{ g/cm}^3$, ou seja, ele concentra grande quantidade de massa num pequeno volume. O uso do mercúrio (Hg) não foi uma inovação, como foi apresentado no início do trabalho, o próprio Torricelli já havia usado anos antes em suas experiências [14].

Seria a densidade dos líquidos uma das variáveis responsáveis por essa grande diferença de dados entre os dois experimentos? Para verificarmos isso visualmente faremos um gráfico simultâneo com os dados de Boyle e os da experiência com água. Os dados foram convertidos para a escala de Mercúrio (Hg).

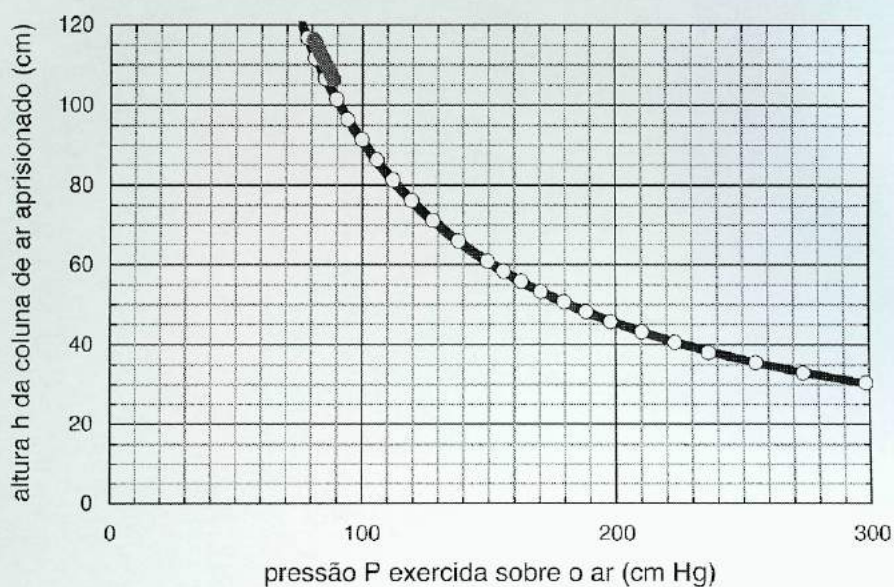


Figura 14. Gráfico obtido a partir dos dados experimentais de Robert Boyle (linha azul) e aqueles obtidos em nosso experimento (em vermelho).

O gráfico ratifica o raciocínio proposto anteriormente. A faixa de dados é bem menor do que a de Boyle e isso se deve ao fato de ele ter usado o mercúrio para comprimir o ar.

Notemos como é importante o número de dados coletados, isso implica decisivamente na escolha da curva que representará o comportamento do fenômeno. Seria preciso uma coluna de mais de 10 m de altura de água para conseguir o mesmo efeito que Boyle conseguiu com a coluna de Mercúrio.

Do ponto de vista prático seria inviável construir um experimento didático desse porte para apresentá-lo em sala de aula. O propósito desse tipo de aula é prender a atenção do aluno e mostrar de onde são tiradas as leis usadas na Física.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O experimento proposto em sala de aula mostrou-se satisfatório em muitos aspectos. Um deles é o baixo custo para sua construção, ou seja, este experimento pode ser confeccionado com material barato sem perder a essência, credibilidade e eficácia.

O efeito visual da experiência em andamento demonstra claramente o comportamento natural do volume de um gás quando se aumenta a pressão, permanecendo a temperatura inalterada.

A experiência foi executada em sala de aula e conseguiu não só prender a atenção dos alunos como foi objeto de motivação para sua realização, utilizando todos os conhecimentos prévios dos mesmos, aumentando assim a interdisciplinaridade, embora esta não fosse o foco principal. Além disso, atendeu perfeitamente ao anseio e orientações dos PCN+, que incentiva a experimentação em sala como método de aprendizagem e construção de conhecimento.

A tomada de dados é bem simples tornando o equipamento de fácil operação e compreensão, deixando o experimentador confortável e seguro do que está fazendo.

A modelagem matemática aqui abordada é também mais uma ferramenta que o professor pode dispor para despertar no aluno o interesse pela Física.

A razão essencial é ensinar ao aluno como experimentar, como analisar, fazer com que ele perceba as grandezas que estão envolvidas e como medi-las e como construir um modelo a partir das observações realizadas.

Mostra sem sombra de dúvida que as fórmulas utilizadas na Física não vêm do acaso, ou então só podem ser descobertas por pessoas geniais. Para que as descobertas ocorram existe sim muito trabalho e muita dedicação e, logicamente o cumprimento de um método de pesquisa e análise de dados. A Física não está longe e nem é tão abstrata como parece, tudo depende de como abordá-la.

APÊNDICE: A LEI DE BOYLE NA PRÁTICA

Esse comportamento descoberto por Boyle, que relaciona a pressão com o volume foi a base para o desenvolvimento da Termodinâmica e possibilitou sem soma de dúvidas a descoberta de muitas substâncias pela Química, ou seja, influenciou diretamente as pesquisas futuras em diversas áreas. Claro que os acontecimentos não ocorreram da noite por dia, leva-se décadas e até séculos para o amadurecimento de idéias novas.

Uma atividade em especial é afetada pela lei de Boyle: mergulhar. Sem o conhecimento prévio dessa lei, a atividade de mergulho que está entre as cinco mais perigosas do mundo, torna-se praticamente um suicídio devido aos danos que podem ser causados ao mergulhador. Isto se deve à constituição esquelética do ser humano, tornando-o suscetível a variações de pressão. Apresentamos neste Apêndice uma pequena discussão sobre os aspectos fisiológicos e a lei de Boyle [21].

Aspectos fisiológicos

Os seres humanos são constituídos de vários tipos de tecidos: ósseo, muscular, epidérmico, entre outros. Esses tecidos originam diversos órgãos dos aparelhos que compõem o corpo humano.

Alguns desses órgãos apresentam uma característica em especial: possuem no seu interior cavidades aéreas, ou seja, espaços de vários tamanhos que contêm ar ou mistura de gases no seu interior.

O grande problema nisso tudo é quando essas cavidades ficam incomunicáveis com o meio ambiente, tornando-se um compartimento fechado. Quando ocorre uma variação de profundidade, ou seja, uma variação de pressão, o volume desse gás irá diminuir caso a pressão aumente, como a cavidade está fechada o gás puxará as paredes desse órgão até conseguir se equilibrar com o meio.

A figura abaixo representa as cavidades aéreas dos seios da face de um ser humano normal.

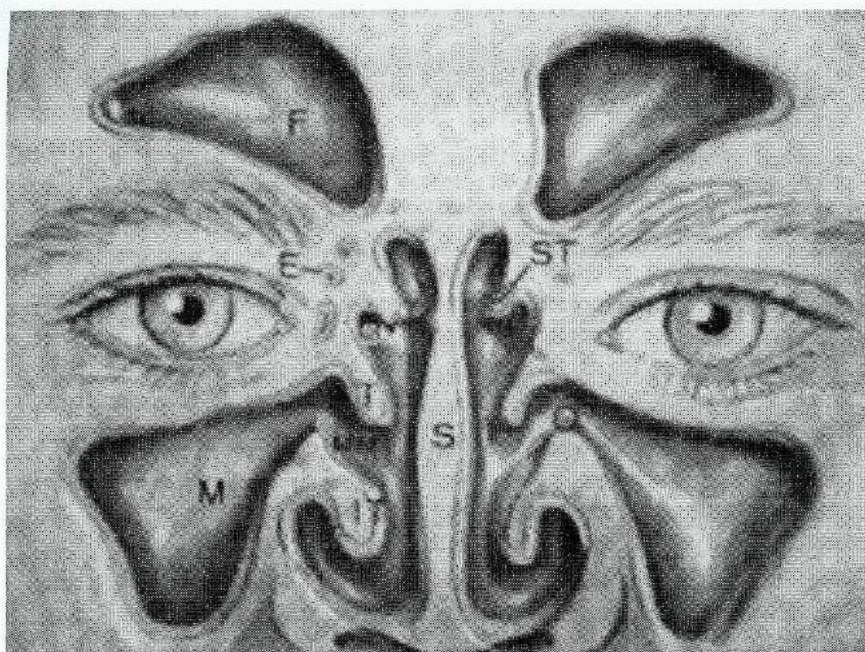


Figura 15. Cavidades aéreas dos seios da face de um ser humano.

Essas cavidades estão comunicadas com o meio normalmente. Porém por algum motivo, os tecidos internos dessas cavidades ficam inchados ou então estão com secreção em excesso que dificultam essa comunicação, na maioria das vezes por uma gripe, resfriado, renite ou sinusite. Quando isso ocorre fatalmente ele sentirá dores na face decorrente do aumento de pressão ao mergulhar. O ar diminui de volume e começa a arrastar a mucosa e os tecidos adjacentes causando sangramento e dor. Neste caso o médico diagnosticará que o mergulhador sofreu um barotrauma sinusal [23], baro significa pressão, trauma significa acidente, sinusal significa sinus (cavidade aérea no crânio acima dos olhos).

Outro caso muito comum no mergulho ou mesmo em piscinas é o barotrauma de orelha média [23]. Ao contrário do que parece a orelha média que

é a parte logo depois da membrana timpânica se comunica com o meio e também possui ar na sua estrutura.

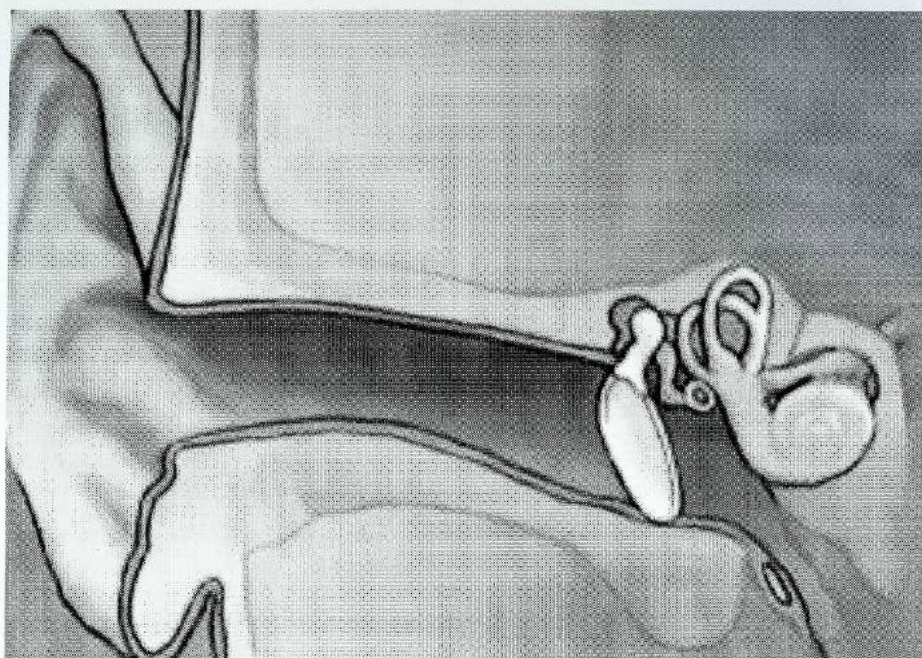


Figura 16.. Orelha de um ser humano.

Observe a figura acima. A região indicada sofre influência da lei de Boyle naturalmente, para equilibrar a pressão exercida na parede timpânica pela água é necessário que o mergulhador realize a “manobra de valsalva”, que consiste em apertar o nariz com os dedos e assoá-lo. Com isso uma quantidade de ar será enviada à orelha média aumentando a pressão interna, contrabalanceando a pressão externa. Caso a comunicação entre a orelha interna e o sistema respiratório esteja interrompido, seja por secreção ou cerume, a manobra é inútil. Se o mergulhador continuar a mergulhar, aumentando a pressão, a membrana timpânica será rompida causando um barotrauma de orelha média, podendo até causar uma surdez definitiva.

Um dos acidentes mais graves do mergulho relacionado com a lei de Boyle é a síndrome da hiperdistensão pulmonar (SHP), ela ocorre quando o mergulhador respira mistura gasosa comprimida com a utilização de equipamento de mergulho de respiração.

Nosso pulmão é uma espécie de bolsa, ou para facilitar o raciocínio, um balão. Em média possui 6 litros de volume à pressão atmosférica. Quando respiramos e admitimos ar nos pulmões, este ar se dirige para as menores unidades da árvore brônquica como mostra a figura:

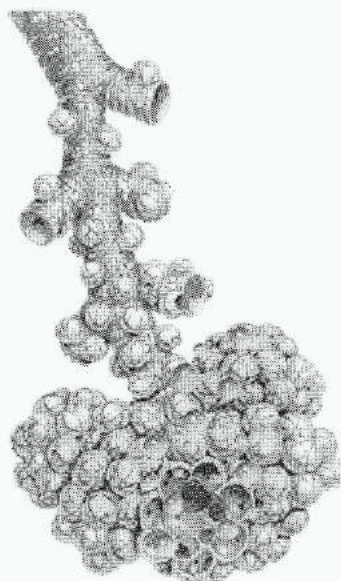
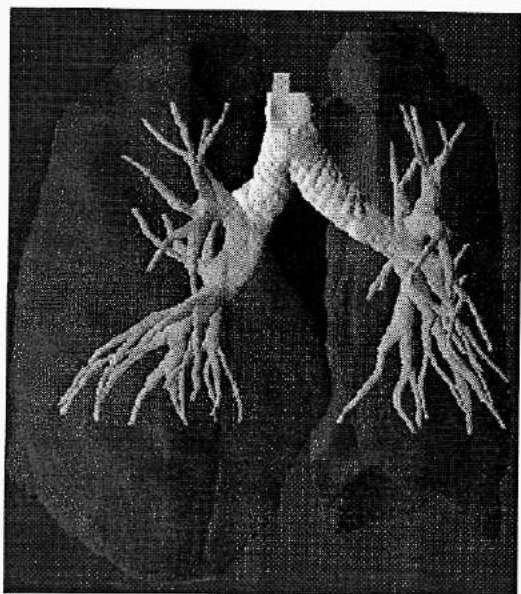


Figura 17. Pulmão de um ser humano e os alvéolos pulmonares, à direita..

Essas unidades minúsculas são chamadas de alvéolos pulmonares, eles são responsáveis efetivamente pelo armazenamento do ar e pela troca gasosa ou hematose. Quando o mergulhador está respirando no fundo, seu pulmão mantém os mesmos 6 litros de volume, ao contrário do que acontece quando o mergulhador deixa a superfície sem o auxílio de equipamento de respiração, fazendo um mergulho em apnéia ou mergulho livre. Neste caso como a pressão

externa aumenta a medida que a coluna de água aumenta, seu volume pulmonar diminui inversamente proporcional, mas se usar mistura gasosa comprimida, o volume se mantém normal. O grande perigo está em deixar o fundo em direção à superfície sem exalar o gás aprisionado nos alvéolos, como se prendesse a respiração. À medida que a pressão diminui o volume do gás nos pulmões aumentará chegando num limite onde os alvéolos estouram liberando o gás dentro das partes protetoras dos pulmões, como as pleuras, por exemplo, ou mesmo rompendo todas as suas camadas e passando o gás para o corpo abaixo da epiderme. O fato mais grave ocorre quando esse gás penetra na corrente sanguínea ocasionando uma embolia traumática pelo ar, interrompendo o fluxo sanguíneo de órgãos vitais como o cérebro, por exemplo, levando a vítima ao coma e morte.

Por isso a atividade de mergulho deve ser levada a sério, mais ainda a lei de Boyle que rege o comportamento do volume gasoso em função da pressão. As operadoras de mergulho que ministram cursos de mergulho sabem dos riscos quanto ao descumprimento da lei de Boyle e o que ela pode acarretar se não cumprida a risca, e orientam seus alunos quanto a isso. Mesmo assim um grande número de acidentes são relatados todos os anos na atividade de mergulho recreativo por despreparo dos mergulhadores.

REFERÊNCIAS

- [1] J. R. M. de Souza, "A experiência da fonte de Heron no Ensino Médio", monografia de final de curso de Licenciatura em física do IF-UFRJ, 2005.
- [2] J. M. S. Neves, "Uma aula alternativa sobre a hidrodinâmica dos fluidos e a tensão superficial das substâncias", monografia de final de curso de Licenciatura em física do IF-UFRJ, 2010.
- [3] Brasil, Secretaria de Educação Fundamental. *Parâmetros curriculares nacionais*. Brasília: MEC/SEF, 1998; Brasil, Ministério da educação. Secretaria de Educação Média e Tecnológica. *Parâmetros curriculares nacionais – Ensino Médio*. Brasília: SEMTEC/MEC, 2000; Brasil, Secretaria de Educação Média e Tecnológica. *PCN+ ensino médio: orientações educacionais complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais: ciências da natureza, matemática e suas tecnologias*. Brasília: MEC/SEMTEC, 2002; Brasil, Ministério da Educação. Secretaria de Educação Básica. *Orientações curriculares para o ensino médio*. Brasília, 2006.
- [4] R.E.W. Maddison, "The Portraiture of the Honourable Robert Boyle", *Annals of Science*, **15** (1959), 141-214. <http://www.bbk.ac.uk/boyle/Issue4.html> - Kerseboom. Acesso em 25 de setembro de 2010.
- [5] E. Potter, *Gender and Boyle's Law of gases*, Indiana Univ. Press, 2001.
- [6] Aristóteles, *Metafísica*, São Paulo: Martins Fontes, 2005.
- [7] L.-É. Rioult, "Retrato de Pierre Gassendi" Louis-Édouard Rioult, <http://www.nmm.ac.uk/mag/pages/mnuExplore/ViewLargeImage.cfm?ID=BHC2700>. Acesso em 25 de setembro de 2010.
- [8] Bourdon, "Retrato de René Descartes". http://www.voltaire-integral.com/Html/14/04CATALO_1_2.html. Acesso em 25 de setembro de 2010.
- [9] J. Sustermans, "Galileo Galilei", National Maritime Museum, <http://www.nmm.ac.uk/mag/pages/mnuExplore/ViewLargeImage.cfm?ID=BHC2700>. Acesso em 4 de junho de 2010.

- [10] Torricelli, como representado na capa de seu livro "Lezioni accademiche". http://en.wikipedia.org/wiki/Evangelista_Torricelli. Acesso em 4 de junho de 2010.
- [11] P. Rousseau, *História da Ciência*, Lisboa: Aster, 1968, pág. 144.
- [12] B. J. Conant, *Como compreender a ciência*, São Paulo: Cultrix, 1947.
- [13] R. de A. Martins. "Tratados Físicos de Blaise Pascal", *Cadernos de História e Física da Ciência*, série 2, v.1, número especial, dez. 1989.
- [14] W. E. K. Middleton, *The History of Barometer*, Johns Hopkins University Press, 2002.
- [15] J. M. F. Bassalo, "Nascimento da Física", *Revista Brasileira de Ensino de Física*, **1**, 8 (1996) 2.
- [16] S. M. Coelho e A. D. Nunes, "Análise de um texto do século XVII: 'A grande experiência de equilíbrio dos líquidos', de Pascal, aspectos do método experimental e reflexões didáticas", *Revista Brasileira de Ensino de Física*, **14**, 1 (1992) xxx.
- [17] Pascal, como representado em um retrato de autor desconhecido do século XVII. http://en.wikipedia.org/wiki/File:Blaise_Pascal_2.jpg. Acesso em 1 de outubro de 2010.
- [18] R. Greer, "Robert Hooke", Department of Engineering Science, Oxford University, http://en.wikipedia.org/wiki/File:13_Portrait_of_Robert_Hooke.JPG. Acesso em 1 de outubro de 2010.
- [19] J. A. Bennett, "Robert Hooke as mechanic and natural philosopher", *Notes and Records of the Royal Society*, **35** (1980-1981) 33-48
- [20] J. B. West, "The original presentation of Boyle's Law", *J. Appl. Phys.*, **87**, 4 (1999) 1443-1545.
- [21] USA, US Navy, *US Manual Diving*, Vol. 1.